油气管道环焊缝非开挖定位弱磁检测技术研究

张帆[1],刘艳军[1],尧宗伟[2]

(1. 西南石油大学机电工程学院,610500 成都;2. 中国石油西部管道塔里木输油气分公司,841000 库尔勒)

摘　要:介绍了非接触式管道弱磁检测技术的原理,并针对实际工程采用非接触式管道弱磁检测仪对油气长输管道环焊缝进行非开挖定位及检测。具体的弱磁检测过程主要分为 3 个步骤:①利用管线探测仪对管道走向和管道埋深进行测绘;②采用载波相位分差技术确定管道的位置坐标(GPS 坐标);③使用弱磁检测仪在管道正上方对其磁场分布进行信号采集。对磁信号图像进行滤波处理,根据磁感应强度沿法向变化量梯度 DB_z 过零点且改变符号,而磁感应强度沿切向变化量梯度 DB_y 出现波峰或波谷的特征来判断特征点处存在环焊缝。通过特征点到里程桩的相对距离与内检测所得管道信息对比,可以得到环焊缝的建设期编号且误差通常小于 1 m。其次根据检测段管道的起点终点 GPS 坐标可以计算出任意特征点的 GPS 坐标,从而得出环焊缝的具体地理位置,为后续管道本体的修复以及定位开挖提供技术支持。

关键词:弱磁检测;无损检测;环焊缝定位

中图分类号:TG115.28　　　　**文献标志码:**A

Weak magnetic detection technology for trenchless positioning of oil and gas pipeline girth welds

ZHANG Fan[1],LIU Yanjun[1],YAO Zongwei[2]

(1. School of Mechatronic Engineering,Southwest Petroleum University,610500 Chengdu,China;
2. Petrochina West Pipeline Company Talimu Oil and Gas Branch Company,841000 Kuerle,China)

Abstract: This paper introduces the principle of weak magnetic detection technology of non-contact pipeline,and uses non-contact pipeline weak magnetic detector for the actual engineering to carry out non-excavation positioning and detection of the ring weld of the oil and gas long pipeline. The specific weak magnetic detection process is divided into three steps:①The pipeline detector is used to detect the pipeline direction and pipeline depth mapping. ②The location coordinates (GPS coordinates) of the pipeline are determined by carrier phase difference technology. ③The magnetic field distribution of the magnetic field is collected with a weak magnetic detector directly above the pipe. The magnetic signal image is filtered and processed,and the characteristics of the characteristics of the characteristic stomp or trough are judged to be present at the feature point according to the change gradient DB_z crossing zero and the symbol change sending the symbol along the change gradient of the change DB_y in the tangential change. By comparing

收稿日期:2020-10-27　　　　**修回日期:**2021-11-07
基金项目:石油天然气装备教育部重点实验室开放基金项目(No. OGE201403-28)
通信作者:刘艳军,教授。E-mail:liuyanjun98@126.com
引用格式:张帆,刘艳军,尧宗伟. 油气管道环焊缝非开挖定位弱磁检测技术研究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):169-175.
ZHANG Fan,LIU Yanjun,YAO Zongwei. Weak magnetic detection technology for trenchless positioning of oil and gas pipeline girth welds[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):169-175.

the relative distance between the feature point and the mileage pile with the pipe information obtained by the internal detection, the construction period number of the ring weld can be obtained and the error is usually less than 1 m. Secondly, the GPS coordinates of any feature point can be calculated according to the starting point and the end point of the detection segment pipeline so as to get the specific geographical location of the ring weld, and provide technical support for the repair of the subsequent pipe body and the location excavation.

Key words: weak magnetic detection; nondestructive testing; girth weld location

油气长输管道在运行过程中,管道内部会受到天然气或石油中的氧化物和可溶性盐类的腐蚀作用,而管道外部容易受到土壤中可溶性盐类的腐蚀。长输管道完成焊接后,焊缝处形成的残余应力并没有完全消除,一旦管道发生腐蚀,这些残余应力就会将一些小伤口逐渐扩展为大伤口,从而破坏管道的结构性能,影响油气输送的安全性[1]。对于长输油气管道的常用检测方法,是根据经验筛选出容易产生应力集中和腐蚀的区域之后再进行开挖,并结合其他常规无损检测方法进行检测[2]。非接触式管道弱磁检测技术是针对漏磁检测需要清管、人为磁化及代价昂贵等问题衍生出的管道外检测技术。与其它无损检测技术相比,能够检测到缺陷初期产生应力集中及由应力集中形成的微观缺陷,从而实现对于管道早期危害的预判和防控[3]。近年来,因其无需开挖、检测方式便捷、经济成本低及在役检测等优势,在管道检测与监控行业逐渐兴起。

非接触式管道弱磁检测技术起源于 Dubov 教授提出的金属磁记忆技术[4],通过研究铁磁构件表面磁信号变化来判断构件损伤程度。文献[5]通过测定不同检测环境和无励磁条件下,地磁场中铁磁材料表面的切向分量 B_y 和法向分量 B_z[5],获得了应力和剩余磁信号间的变化关系,总结得出弱磁检测技术具有在役检测等优点。文献[6]对爆破试验后破裂的管件进行弱磁检测试验,准确地找出了缺陷位置,验证了弱磁检测方法的有效性。文献[7]通过理论研究,在非开挖条件下验证了弱磁检测技术对埋地管道缺陷具有良好的检测效果。文献[8]对油气长输管道进行管道弱磁检测,得出弱磁信号与应力集中存在一定的线性关系。现阶段,国内外对弱磁检测技术的研究还处于初期阶段,长输管道研究主要针对埋地管道的应力分析[9]。对磁信号特征分析及由应力引起的磁信号变化规律的研究,主要通过理论分析和实验方法,弱磁检测技术在实际工程中的应用还有待进一步的拓展。

本研究利用管道弱磁检测技术对西部管道公司塔里木输油气分公司所属的西气东输二线轮南-孔雀河段进行了检测,与内检测结果对比,发现焊缝检出率较高,同时缺陷焊缝的检出率甚至大于内检测结果(弱磁检测可以进行早期的损伤诊断)。证明了该技术可以定位出焊缝位置,同时可以定性分析出缺陷焊缝的损伤程度。

1 管线基础信息

本次检测管道属于中石油管道有限责任公司西部塔里木输油气分公司所管辖的西气东输二线轮吐支干线轮南-孔雀河段,全线长约 179 km,管道材质为 X70 钢。采用非接触式管道弱磁检测技术对该管段环焊缝进行定位检测。具体管道基础信息见表 1。

表 1 检测管道参数

Tab. 1 Detection of pipeline parameters

管道信息	参数
管道名称	轮吐支干线
管道长度/km	179
管道壁厚/mm	14.6
管道外径/mm	1 016
运行压力/MPa	8.8
设计压力/MPa	10
管道材质	X70
管道埋深范围/m	1.2 ~ 2.5
输送介质	天然气

2 非接触式管道弱磁检测原理

弱磁检测技术以金属磁记忆效应和压磁效应为基础[10],在非励磁条件下(地磁环境下),通过弱磁检测仪所携带的高灵敏度测磁传感器,检测铁磁管道表面在应力作用下的弱磁场信号分布及变化特

征,以此来判断管道应力集中状态,进而实现针对一定埋深的管道应力状态的在线检测。

2.1 压磁效应

当铁磁管道处于信号微弱的地磁场环境中,管道被地磁场磁化,从而在管道本体周围形成一定的弱磁场。环焊缝处的残余应力或缺陷处的应力集中作用于管体时,导致该处磁化强度发生改变,引起铁磁管道磁场强度及分布特征的改变,从而产生应力弱磁信号。将这种应力作用改变磁化强度的现象称为逆磁致伸缩效应,也称为压磁效应。

在考虑铁磁管道内部环焊缝处的应力集中时,铁磁管道内部的自由能为

$$E = E_k + E_\sigma \tag{1}$$

式中:E_k为无应力时铁磁管道的自由能,其主要为磁弹性能;E_σ为应力作用的应力能,表达式为[11]

$$E_\sigma = -3/2\ \lambda_s \sigma \cos^2\theta \tag{2}$$

式中:λ_s为饱和磁化状态下的磁致伸缩系数;θ 为磁化强度矢量方向与应力之间的夹角。

根据物质的能量平衡原则,物质的稳定状态必是能量最小状态。只有减小铁磁性材料的应力能,或者减小磁弹性能,才能使总的能量最小。由上式可知,减小应力能的方式是改变磁化强度的方向。应力能的减小会导致磁弹性能的增加,产生磁弹性效应[12-13]。根据磁弹性效应,达到饱和状态后的残余磁感应强度和残余磁化强度都会相应增加。因此,当铁磁管道受到应力作用时,为减小应力能,材料内部会增加磁弹性能,并且磁化强度的大小和方向也将受到影响。而磁化强度矢量的改变导致磁感应强度的变化,弱磁检测技术就是基于磁信号分布及变化特征,来反演特征点处的应力集中状态,实现对应力集中区的预判。

2.2 磁记忆效应

当铁磁管道在周期性承压应力 δ 和地磁场 H 的作用下,由于应力的作用,不但产生弹性应变,并且会产生压磁效应,引起磁畴壁的移动。由巴克豪森效应可知,这种磁畴壁的移动不可逆,所以即使消除应力的作用,也会有残余磁感应强度的存在。磁记忆效应就是在循环应力的作用下,铁磁材料的剩磁和自发磁化不断增加的现象。

3 非接触式管道弱磁检测

非接触式管道弱磁检测过程主要分为 3 个步骤:首先,使用管线定位仪对管线走向和管道埋深进行测绘;其次,使用载波相位分差技术,依据参考点记录每段待测小区间管道的起点终点 GPS 坐标;最后,使用非接触式管道弱磁检测仪对管道周围的磁场变化进行信号采集。

3.1 管线路由及管道埋深测绘

采用英国雷迪精确定位管线仪雷迪 8000(RD8000)来确定管线走向以及管道埋深。RD8000主要由特殊信号发射机和接收机两部分组成,如图 1所示。其中右侧发射机与管道和大地连接形成等效电路,并给管道施加一特定电信号,左侧接收机内的感应线圈探测到该信号,通过识别信号电流的大小和方向,实现管道埋深和走向的确定。测绘管线路由的具体过程如下。



图 1 雷迪 8000 实物图

Fig. 1 RD8000 physical map

1)连接发射机,红线接里程(阴保)桩,黑线接地,并将发射机放置在管道平行的位置。

2)开启发射机和接收机,对频率进行调整,使两者频率相同(现场一般使用 33 kHz)。

3)调整接收机天线模式为谷值模式,朝着管道大致路线向前行走,根据显示屏上左右箭头确定管道路由,当左右箭头同时显示并出现埋深距离数值时,可以确定接收机位于管道正上方。

3.2 管道位置坐标确定

根据《无损检测管道弱磁检测方法》(GB/T 35090—2018)规定,每段实际检测里程不得大于100 m,所以将待测管道划分为里程小于 100 m 的多段小区间管段。利用载波相位分差技术(RTK)划分管道,并且对各段小区间的起点和终点进行标记和定位,同时记录各小区间起点和终点相对参照物(一般为里程桩)的实际里程。在划分及定位待测管道时,遇到标志桩、弯头、堡坎、电缆、及磁场干扰源等,记录其位置坐标和相对里程。

检测完成后，将各小区间的 GPS 坐标从仪器中导出，结合记录的数据制作出相应的检测信息表。

3.3 磁信号采集

采集磁信号使用的是由西南石油大学自主研发的非接触式管道弱磁检测仪，两端为两个三轴磁通门传感器，分别采集沿 x、y、z 方向上的空间磁感应强度。传感器的测量范围为 ±100 μT，能够对一定埋深的管道测得其磁信号的变化。检测仪器主要包含三个模块：①磁信号采集模块；②信号处理电路模块，对磁信号数据做出相应的预处理；③实时显示与储存模块，用于显示实时波形图与存储检测数据。非接触式管道弱磁检测仪如图 2 所示。



图 2　非接触式管道弱磁检测仪

Fig. 2　Non-contact pipe weak magnetic detector

依据管道走向和标定位置，利用非接触式管道弱磁检测仪，对每段被测管道进行不少与 4 次的磁信号采集。在检测过程中，检测人员手持管道弱磁检测仪沿着管道标记点在管道正上方行走，测量管道外的磁信号强度。测量时，设备要保持稳定且在身体同一高度，同时要保持匀速前进。如图 3 所示。

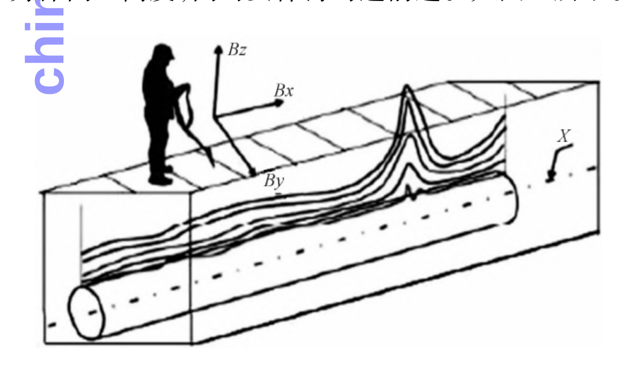


图 3　非接触式管道弱磁检测示意图

Fig. 3　Schematic diagram of non-contact pipeline weak magnetic detection

4　磁信号数据处理与分析

4.1　原始数据预处理

非接触式管道弱磁检测仪导出所检测磁信号数据为 txt 文本文件，此时原始数据为两个传感器所测的空间磁感应强度 $B_{x_{1,2}}$、$B_{y_{1,2}}$、$B_{z_{1,2}}$，以及综合磁感应强度 DQ。具体情况见图 4。

Bx1 (μT)	By1 (μT)	Bz1 (μT)	Bx2 (μT)	By2 (μT)	Bz2 (μT)	DQ (μT)	里程 (m)
-32.7498	7.497	-43.6225	-25.7574	5.6366	-41.3855	0.2007	0.32
-26.2164	2.2087	-44.1588	-25.7031	0.8009	-41.9444	0.1907	0.65
-25.4772	2.5269	-44.9613	-25.1222	0.9905	-42.7418	0.2023	1.51
-24.7951	2.7477	-46.4255	-24.7923	1.0515	-44.0076	0.2167	2.58
-24.9222	-0.0729	-47.6025	-25.1155	-1.4766	-45.0618	0.2407	3.47
-23.2688	0.081	-49.5818	-23.9421	-1.2658	-46.8747	0.2623	4.72
-23.2809	-0.9949	-50.5288	-24.1974	-2.1514	-47.8112	0.2751	5.94
-23.2589	-3.7435	-51.2571	-24.3429	-4.895	-48.5243	0.2871	6.99
-23.138	-3.353	-52.167	-24.5335	-4.5762	-49.3972	0.3001	7.89
-24.113	0.1487	-52.9386	-25.9824	-1.4294	-50.0783	0.3216	9.09
-23.2998	-0.5445	-54.4967	-25.5978	-1.8746	-51.6835	0.3238	10.12
-22.0692	0.2441	-57.1372	-25.1428	-1.1449	-54.1361	0.3284	11.31
-21.0845	-2.0325	-60.0993	-25.052	-3.5931	-56.9612	0.3616	12.49
-22.4835	-5.7676	-61.167	-26.8905	-6.9088	-57.7714	0.3967	13.81
-22.2003	-9.6264	-59.9323	-26.3346	-10.9003	-56.8327	0.4267	14.7
-20.8331	-5.2915	-59.5061	-24.5984	-6.5745	-56.594	0.4187	15.92
-22.069	-6.5459	-58.1812	-25.4892	-7.5403	-55.2821	0.3665	16.79
-24.6731	-6.3271	-56.9335	-27.9295	-7.4427	-53.8706	0.3504	17.69
-21.3333	-3.4043	-58.6107	-25.0897	-4.4756	-55.6382	0.3442	18.7
-21.5996	-9.066	-57.1754	-24.9916	-9.741	-54.3093	0.3283	19.91
-21.9207	-11.4627	-55.2519	-24.9244	-11.8473	-52.3834	0.3035	21.11
-21.4469	-13.4116	-52.4313	-23.8356	-13.8044	-50.1152	0.268	22.15
-21.2895	-11.5458	-49.832	-22.849	-12.4257	-47.9385	0.2271	23.25

图 4　部分原始数据

Fig. 4　Part of raw data

综合磁感应强度 DQ 在数值上等于各分量磁感应强度梯度平方的和再开根号。主要用来定性判断特征点出的焊缝缺陷程度。

$$DQ = \sqrt{DB_x^2 + DB_y^2 + DB_z^2} \tag{3}$$

将管道弱磁检测仪中的原始数据，按照管道分段进行分类并保存在相应小区间管段的子文件夹。将收集到的原始数据进行初步分类整理，依据检测过程中完成的管道分段测绘信息表对各管段磁信号进行预处理。具体的预处理步骤主要分为以下 3 个步骤。

1）将文本文档导入 excel 中，计算各个方向的磁感应强度差值 $\Delta B_{x,y,z}$ 如式(4)所示，以消除两个传感器信号叠加部分的影响。

$$\Delta B_i = B_{i1} - B_{i2} \tag{4}$$

利用磁场信号的无源性和无旋性，计算空间各方向上磁感应强度梯度如式(5)所示。

$$DB_i = \Delta B_i / \Delta l \tag{5}$$

式中：DB_i 为空间各方向磁感应强度梯度；Δl 为两个传感器之间的距离。

2）再将 excel 中的各方向磁感应强度梯度和里程数据导入到 origin 软件中，做出磁感应强度与里程间关系图像。具体情况如图 5 所示。

3）通过 Savitzky-Golay 滤波方法进行滤波，使数据图形更加平滑，特征信号更加明显。图 6 为滤波后的磁感应强度关于里程的分布。

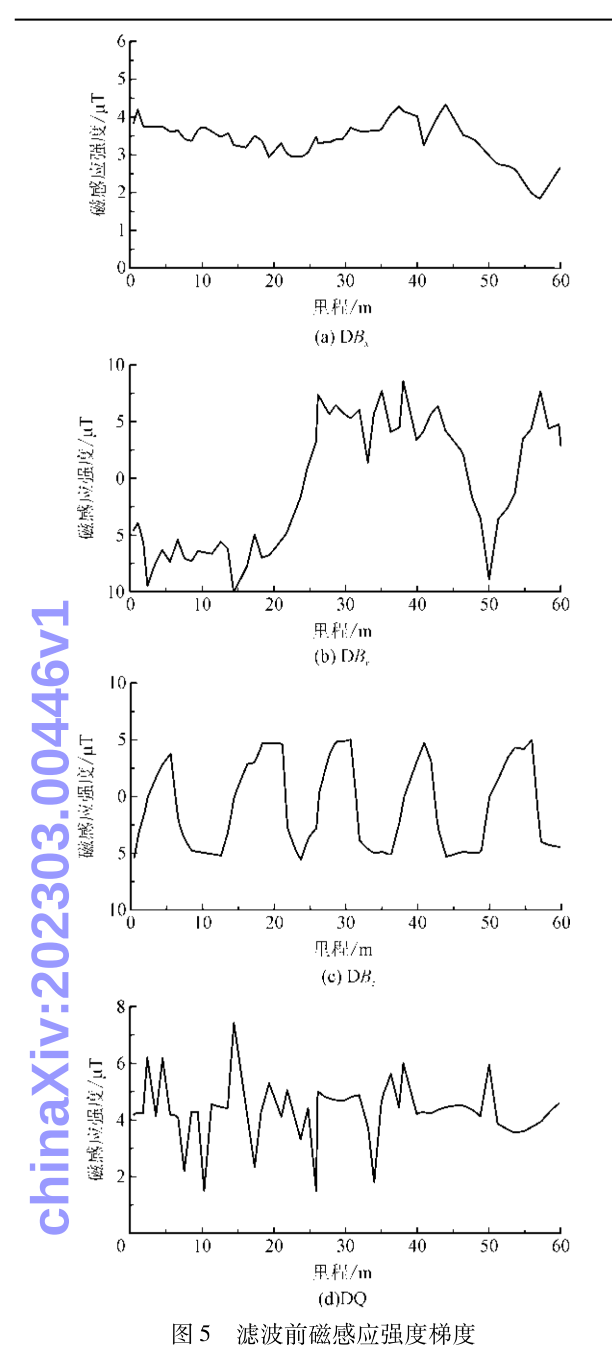


图 5　滤波前磁感应强度梯度

Fig. 5　The gradient of magnetic induction intensity before filtering

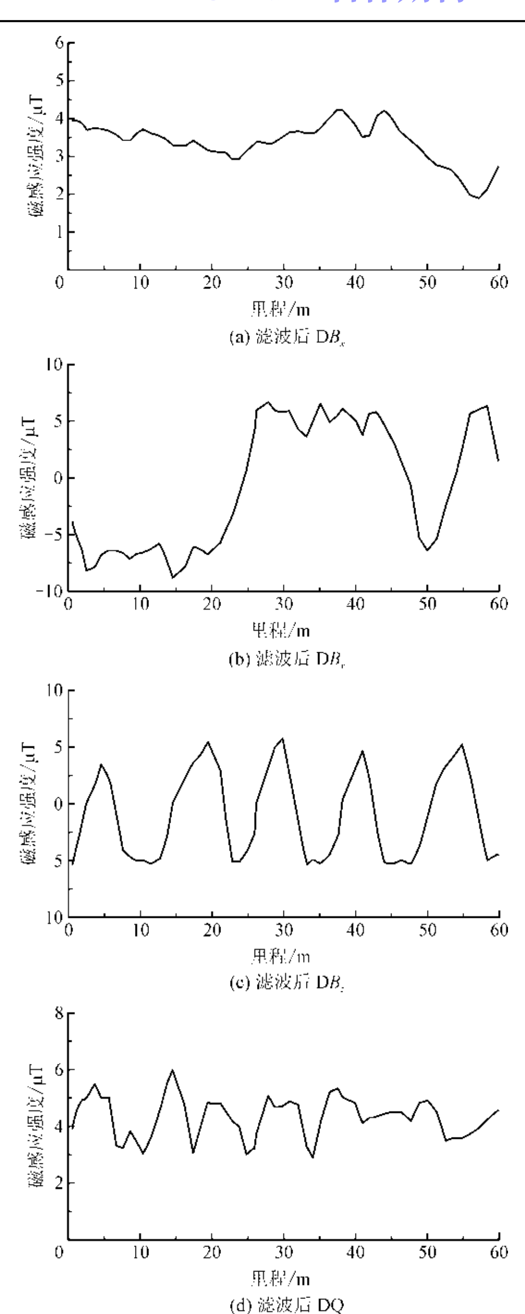


图 6　滤波后的磁感应强度梯度

Fig. 6　The gradient of magnetic induction intensity after filtering

4.2　数据分析

铁磁管道在外载荷作用下，在焊缝处由于几何、材料的不连续导致该区域存在应力集中。应力集中区发生了磁畴不可逆的重新排列，即使外载荷卸载以后依然维持该状态[14]。同时铁磁管道表面产生可测量的弱磁磁场，弱磁磁场的法向磁感应强度梯度过零点且改变符号，而磁感应强度沿切向变化量梯度出现极值[15-17]。图 7 所示为特征点处磁信号示意图。其中 B_y 代表切向磁感应强度梯度，B_z 代表法向磁感应强度梯度。

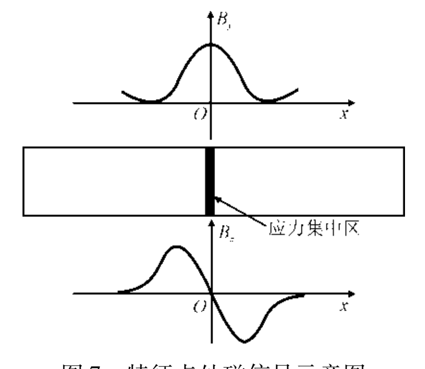


图 7　特征点处磁信号示意图

Fig. 7　A map of the magnetic signal at the feature point

文献[18]为研究铁磁管道焊缝处应力集中区和弱磁场的定量关系,建立了应力集中区的磁偶极子等效模型如图 8 所示,可以定性解释漏磁场出现极大值与过零点的原因。

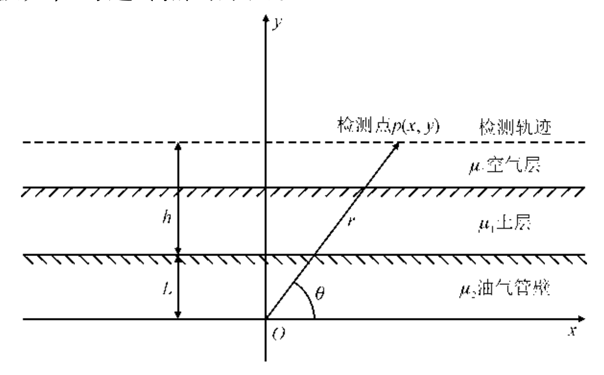


图 8　应力集中区的磁偶极子模型

Fig. 8　A model of a magnetic dipole in a stress concentration

根据这样的等效,可以计算铁磁管道表面的磁场分布情况。反过来,根据非接触式管道弱磁检测仪检测到的磁场分布情况可以得到环焊缝的位置。根据文献[19]推得,油气管道环焊缝处应力集中区等效的磁偶极子在检测点 p 处产生的磁感应强度切向和法向分量为

$$B_x = \frac{\mu_1\mu_2\mu_0 m}{2\pi r^3(\mu_1+\mu_2)}(2\cos2\theta - \sin2\theta) \qquad (6)$$

$$B_y = \frac{3\mu_1\mu_2\mu_0 m}{2\pi r^3(\mu_1+\mu_2)}\sin\theta\cos\theta \qquad (7)$$

式中:μ_2为油气管道的相对磁导率;μ_1为空气和土层的相对磁导率;真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ N/A^2,坐标原点指向检测点 $p(x,y)$ 的矢量为 r;θ 为 r 与 x 轴正向的夹角;m 为磁偶极子的磁矩。

根据焊缝处应力集中产生的磁场信号特征来判定焊缝位置。当在管道正上方检测时,特征点处磁感应强度变化有以下特征:法向磁感应强度梯度 DB_z 过零点且改变符号,切向磁感应强度梯度 DB_y 出现波峰或波谷(即极值点)。基于上述特征点理论与磁信号图进行对比,发现 5 处特征点,如图 9 所示。

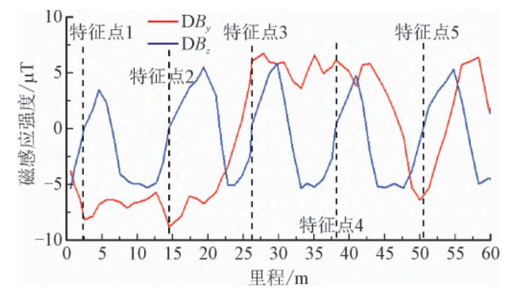


图 9　磁感应强度分量变化量梯度

Fig. 9　The gradient of the change of magnetic induction intensity

4.3　环焊缝定位

通过上述分析可以确定特征点相对测试桩的位置。图 10 为本次检测段 134 号里程桩下游 0 ~ 60 m 的分析数据,5 处特征点相对里程桩的距离见表 2。

表 2　特征点位置

Tab. 2　Feature point position

特征点编号	相对里程桩的距离/m
1	2.5
2	14.5
3	26.2
4	37.8
5	50.1

表 3 为内检测关于 134 号测试桩相关的部分数据,包含内检测焊缝编号、相对测试桩的距离、以及建设期的焊缝编号。

表 3　内检测部分数据

Tab. 3　Internal detection of partial data

内检测环焊缝编号	内检测定位信息		施工焊口编号
	最近参考点名称	距近参考点距离/m	
114490	83,定位盒,桩号:134,偏移:0	下游 2.3	LNX-LT-KEL055-101-Y-020
114500	83,定位盒,桩号:134,偏移:0	下游 14.1	LNX-LT-KEL055-101-Y-019
114510	83,定位盒,桩号:134,偏移:0	下游 26.1	LNX-LT-KEL055-101-Y-018
114520	83,定位盒,桩号:134,偏移:0	下游 38.0	LNX-LT-KEL055-101-Y-017
114530	83,定位盒,桩号:134,偏移:0	下游 50.0	LNX-LT-KEL055-101-Y-016

通过与内检测数据对比发现环焊缝特征点到参考点(里程桩)的距离与内检测中距近参考点距离接近,如焊缝特征点 1 距离测试桩为 2.5 m,而内检测数据中距近参考点距离为 2.3 m。由此可以证明特征点 1 确实为一条环焊缝。其内检测环焊缝编号为114490,管道建设期焊缝编号 LNX-LT-KEL055-101-Y-020。具体对比信息见表 4。

通过对比结果发现,非接触式弱磁检测发现的焊缝特征点与内检测结果和管道建设期信息基本吻合,误差小于 1 m。根据小区间管段的起点终点 GPS 坐标以及特征点相对参考点(小区间管段的起点)的距离,可以计算出特征点的 GPS 坐标,从而掌握

环焊缝的具体地理位置,为后续管道本体修复及开挖提供技术支持。同时也表明非接触式管道弱磁检测技术能为管道监测、修复以及管道定位开挖提供新的方法与思路。

表 4 特征点与内检测数据对比

Tab. 4 Comparison of feature points and internal detection

特征点位置		内检测资料		误差/m
特征点编号	位置/m	焊缝编号	参考点距离/m	
1	2.5	114490	2.3	0.2
2	14.5	114500	14.1	0.4
3	26.2	114510	26.1	0.1
4	37.8	114520	38.0	0.2
5	50.0	114530	50.0	0.1

5 结 论

用非接触式管道弱磁检测技术对在役管道环焊缝进行定位与检测,通过对磁信号的处理与分析可得出以下结论。

1)铁磁管道环焊缝或缺陷处,在残余应力及循环载荷的作用下会导致其磁化强度的变化,并且根据磁弹性效应,在环焊缝或缺陷处的磁感应强度和磁化强度都会相应增加。

2)当磁感应强度沿法向变化量梯度 DB_z 过零点且改变符号,而磁感应强度沿切向变化量梯度 DB_y 出现波峰或波谷时,根据经验可以判定该特征点处存在环焊缝。

3)非接触式弱磁检测技术的结果,经过内检测的验证,其误差小于 1 m,证明了其可行性。

4)基于小区间管段的起点终点 GPS 坐标以及特征点相对参考点(小区间管段的起点)的距离,可以计算出特征点的 GPS 坐标,从而掌握环焊缝的具体地理位置,为后续管道本体修复及开挖提供技术支持。

参考文献

[1] 房克栋,张红星,史玉胜,等. 浅谈我国油气长输管道检测的现状与发展[J]. 中国石油石化,2016(增刊2):34. (FANG Kedong,ZHANG Hongxing,SHI Yusheng,et al. On the present situation and development of oil and gas pipeline inspection in China [J]. China petrochem,2016(S2):34(in Chinese)).

[2] 胡玉婵. 埋地钢管腐蚀及检测技术研究现状[J]. 管道技术与设备,2017(1):43-46. (HU Yuchan. Research status of buried steel pipeline corrosion and inspection technology[J]. Pipeline technique and equipment,2017(1):43-46(in Chinese)).

[3] 杨理践,王国庆,高松巍,等. 基于 OPWP 算法力磁耦合磁记忆信号特征研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7):1588-1595. (YANG Lijian, WANG Guoqing, GAO Songwei, et al. Study on force magnetic coupling magnetic memory signal characteristics based on OPWP algorithm[J]. Chinese journal of scientific instrument,2016,37(7):1588-1595(in Chinese)).

[4] DUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal science and heat treatment,1997,39(9):401-405.

[5] WILSON J W,TIAN G Y,BARRANS S. Residual magnetic field sensing for stress measurement[J]. Sensors and actuators A:physical,2007,135(2):381-387.

[6] 戴光,王文江,李伟. 不同构件的磁记忆检测及分析方法研究[J]. 无损检测,2002,24(6):262-266. (DAI Guang, WANG Wenjiang,LI Wei. Magnetic memory testing and analysis of different structures[J]. Nonde structive testing,2002,24(6):262-266 (in Chinese)).

[7] 韩烨. 管道本体缺陷弱磁检测技术及应用[J]. 管道技术与设备,2019(3):27-30. (HAN Ye. Weak magnetic technology and application on pipeline ontology defect testing[J]. Pipeline technique and equipment,2019(3):27-30(in Chinese)).

[8] LIU B,HE L Y,MA Z Y,et al. Study on internal stress damage detection in long-distance oil and gas pipelines via weak magnetic method[J]. ISA transactions,2019,89:272-280.

[9] 孙靖云,陈利琼,夏燕,等. 地震载荷工况下隧道内油气管道应力分析研究[J]. 应用力学学报,2017,34(4):795-801. (SUN Jingyun,CHEN Liqiong,XIA Yan,et al. Stress analysis of oil and gas pipeline at seismic load conditions in tunnel[J]. Chinese journal of applied mechanics,2017,34(4):795-801(in Chinese)).

[10] LIU B,SUN W R,LIN Y R. The study of electromagnetic stress testing method on oil-gas pipelines based on WT[J]. Geomaterials, 2014,4(2):55-63.

[11] 冷建成. 基于磁记忆技术的铁磁性材料早期损伤诊断方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[12] 程强强,夏桂锁,于润桥,等. 基于微磁的连续油管在线检测技术[J]. 天然气工业,2014,34(7):109-114. (CHENG Qiangqiang, XIA Guisuo, YU Runqiao, et al. Mico-magnetic-based online testing for coiled tubing operations[J]. Natural gas industry, 2014,34(7):109-114(in Chinese)).

[13] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect[J]. Journal of physics D:applied physics,1995,28(8):1537-1546.

[14] 任吉林,林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,2000.

[15] 任文坚. 磁记忆检测基础问题的试验研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2013.

[16] 姚凯. 基于金属磁记忆法的铁磁材料早期损伤检测与评价的实验研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.

[17] DUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method [J]. Chemical and petroleum engineering,2012,47(11/12):837-839.

[18] 安琳琳,姜海燕,周葳,等. 基于金属磁记忆检测技术的油气管道检测研究[J]. 石油和化工设备,2015,18(5):55-57. (AN Linlin,JIANG Haiyan,ZHOU Wei,et al. Research on oil and gas pipeline detection based on metal magnetic memory detection technology[J]. Petro & chemical equipment,2015,18(5):55-57(in Chinese)).

[19] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

(编辑 李坤璐)